第 38 卷第 3 期 2018 年 2 月
生 态 学 报 ACTA ECOLOGICA SINICA
Vol.38,No.3 Feb.,2018

DOI: 10.5846/stxb201612022483
王建林,冯西博,付刚,侯维海,王改花,大次卓嘎,钟志明.青藏高原栽培大麦千粒重空间分布格局及其与环境因子的关系.生态学报,2018,38(3):1114-1123.
Wang J L, Feng X B, Fu G, Hou W H, Wang G H, Dacizhuoga, Zhong Z M.Relationship between spatial distribution pattern and factors affecting weight per thousand seeds of cultivated barley in Qinghai-Tibet Plateau.Acta Ecologica Sinica,2018,38(3):1114-1123.

青藏高原栽培大麦千粒重空间分布格局及其与环境因子的关系

王建林[1],冯西博[1],付 刚[2],侯维海[1],王改花[2],大次卓嘎[1],钟志明[2,*]
1 西藏农牧学院植物科学学院,林芝 860000
2 中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101

摘要:千粒重是大麦产量的重要构成因素之一。青藏高原强辐射、低温、干旱的生态环境孕育了现代农业所急需的大麦种质资源,但是迄今为止尚未见到有关青藏高原栽培大麦 WTS 与环境因子关系的系统性研究报道。为了揭示青藏高原栽培大麦千粒重的空间分布规律,探明不同环境因子对青藏高原栽培大麦千粒重(WTS)积累的影响程度,利用 83 个样点的地理、气候、土壤因子数据,研究了青藏高原栽培大麦 WTS 的分布特征。结果表明:(1)在地理水平方向上,青藏高原栽培大麦 WTS 总体呈现出斑块状交错分布的格局,形成了以西藏曲水、堆龙德庆、白朗、乃东、日喀则、扎囊、贡嘎、加查、达孜、谢通门、拉孜、定日为中心的青藏高原西南部和青海海晏、门源、刚察为中心的青藏高原东北部等 2 个栽培大麦 WTS 高值区;(2)在地理垂直方向上,栽培大麦 WTS 的变化呈现出"N"型分布格局,即在海拔 3600.0—3900.0m 和 4500.0m 以上形成 2 个 WTS 高值区,这 2 个海拔区间栽培大麦 WTS 分别为(49.6815±10.0764)g 和(47.9500±0.1732)g;(3)影响栽培大麦 WTS 的环境因子从大到小的顺序是抽穗-成熟期降水量>土壤速效钾含量>分蘖-拔节期日照时数>抽穗-成熟其平均气温>抽穗-成熟期日照时数>拔节-抽穗平均气温日较差>地理经度。

关键词:栽培大麦;千粒重(WTS);空间分布规律;影响因子;青藏高原

Relationship between spatial distribution pattern and factors affecting weight per thousand seeds of cultivated barley in Qinghai-Tibet Plateau

WANG Jianlin[1], FENG Xibo[1], FU Gang[2], HOU Weihai[1], WANG Gaihua[2], Dacizhuoga[1], ZHONG Zhiming[2,*]
1 *College of Plant Science*, *Tibet Institute of Agriculture and Animal Husbandry*, *Linzhi* 860000, *China*
2 *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100101, *China*

Abstract: Weight per thousand seeds (WTS) is an important quality character of barley grain. In recent years, some researchers have shown that WTS is affected by genetic factors, as well as by its cultivation and environmental conditions. However, the effects of different environmental factors on barley WTS remain unclear. In addition, although previous studies have mostly been conducted at several sites, large-scale studies have not systematically addressed the relationship between cultivated barley WTS and environmental factors. Moreover, with a large number of hull-less barley varieties or resources being required on an urgent basis for modern agriculture development in an environment of high radiation, low temperature, and drought, Qinghai-Tibet Plateau is an important region for growing hull-less barley in China. However, until now, the relationship between barley WTS and environmental factors in Qinghai-Tibet Plateau has not been reported. Therefore, the

基金项目:国家自然科学基金(31360300,31370458,31560362);西藏自治区重点项目(XZXTCX-2015-03,XZXTCX-2016,XZZWCXPT-2015-01);西藏农牧学院雪域英才工程人才发展支持计划项目(2015XYB01);作物学科建设项目(2015ZWXKJS,2016ZWXKJS)
收稿日期:2016-12-02; **网络出版日期:**2017-10-18
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhongzm@ igsnrr.ac.cn

present study investigated the distribution of cultivated barley WTS characteristics in Qinghai-Tibet Plateau using geography, climate, soil, and agronomy data from 83 sampling sites. The aim of this study was to identify the relative effects of different environmental factors on WTS, to clarify the relationship between the distribution of barley WTS and environmental factors, and to explicitly assess acclimation of WTS of barley varieties planted in different areas to the environment. The results showed that (1) WTS exhibited a macrocosm pattern of spatial distribution along the horizontal direction in Qinghai-Tibet Plateau, with staggered patches of different values and an N-shaped tendency. In addition, two regions of higher WTS (south-western and north-eastern) included the counties of Qushui, Duilongdeiqin, Naidong, Shigatse, Zhanang, Gongga, Jiacha, Dazi, Qiongjie, Lazi, and Dingri in Tibet and Haiyan, and Mengyuan and Gangcha in Qinghai Province. (2) Along the vertical direction, GSC distribution exhibited a pattern with double peaks, with two higher value zones between the altitudes from 3600.0 m to 3900.0 m and that above 4500.0 m with average WTS values of (49.6815 ± 10.0764) g and (47.9500 ± 0.1732) g, respectively. (3) The effect of the magnitude of environmental factors on WTS followed an order of precipitation during the growth period from heading to maturation > soil available K content > sunshine hours during the growth period from tillering to elongation > average temperature during the growth period from heading to maturation > sunshine hours during the growth period from heading to maturation > average diurnal temperature range during the growth period from elongation to heading > longitude.

Key Words: cultivated barley; weight per thousand seeds(WTS); spatial distribution pattern; influence factor; Qinghai-Tibet Plateau

大麦是全球栽培的第四大谷类作物,包括皮大麦(通常俗称为大麦,*Hordeum vulgare* L.)和裸大麦(通常俗称为青稞、元麦、裸麦,*Hordeum vulgare* var.*nudum* HK f.)2 种。其适应性强,利用价值广泛,不仅广泛用于食品和饲料,还用于啤酒酿造。千粒重(Weight per Thousand Seeds, WTS)是大麦产量的重要构成因素之一,它和作为麦芽提取物主要来源的淀粉之间表现为明显的正相关关系,是一个复杂的性状[1-2]。近年来,一些研究者认为大麦的 WTS 不仅明显受其本身遗传因素的影响[3-6],还在很大程度上受温度、水分、氮肥和土壤类型等环境因素的影响[7-9]。但是,不同的环境因子是如何影响大麦 WTS 的,目前尚存在很大争议[10-12]。另外一些研究者则认为,不同环境对大麦的 WTS 没有明显影响[13-14]。而且,这些研究多是在几个地点进行试验所得出的结论。截至目前,国内外尚未见到在大尺度上进行栽培大麦 WTS 与环境因子关系的研究报道。

青藏高原是我国典型的低纬度、高海拔农业区。这里既是世界大麦起源中心之一,又是中国重要的大麦(青稞)种植区。青藏高原强辐射、低温、干旱的生态环境孕育了现代农业所急需的大麦大粒种质资源[15-17]。但是迄今为止,除个别学者粗略分析过部分西藏栽培大麦的 WTS 与个别气候因素的关系外[15,17-18],尚未见到有关青藏高原栽培大麦 WTS 与环境因子关系的系统性研究报道。然而,揭示青藏高原栽培大麦 WTS 与环境因子的关系,对于丰富大麦基础理论和指导农业生产,无疑具有重要的学术价值和积极的生产意义。为此,本研究试图以青藏高原为研究区,以藏区群众主要食粮的青稞为对象,运用农学和地理学相结合的研究方法,从大尺度上研究栽培大麦 WTS 的空间分异规律,以期为揭示环境(地理、气候、土壤)因子对青藏高原栽培大麦 WTS 积累的影响程度,完善大麦 WTS 空间分异与环境因子的关系,明确青藏高原不同地区栽培大麦 WTS 的环境效应,为指导青藏高原大麦育种、栽培和加工提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区涉及四川、甘肃、青海、西藏等 4 个省(区)主要栽培大麦种植区。研究区跨越山地草原、高寒草甸草原、高寒灌丛草甸、山地针叶林、山地灌丛草原、山地荒漠、半荒漠等 7 个自然植被带,年均日照时数 1642—3393h,年均温-0.6—12.9℃,年均降水量 150—890mm。研究对象均为当地种植的裸大麦(即青稞),涉及 83

个品种,其中地方农家品种 67 个,当地推广品种 16 个。

1.2 样品采集与分析

(1)样点布置 根据青藏高原大气温度和降水分布格局,于不同生态种植区(27°—38°N、79°—104°E)设置 83 个典型样点。在样点设置时,重点选择长势整齐、成片种植的栽培大麦田,所有样点的具体地理位置如图 1 所示,所有样点的地点与栽培大麦品种如表 1 所示,每个样点面积不小于 120m²。

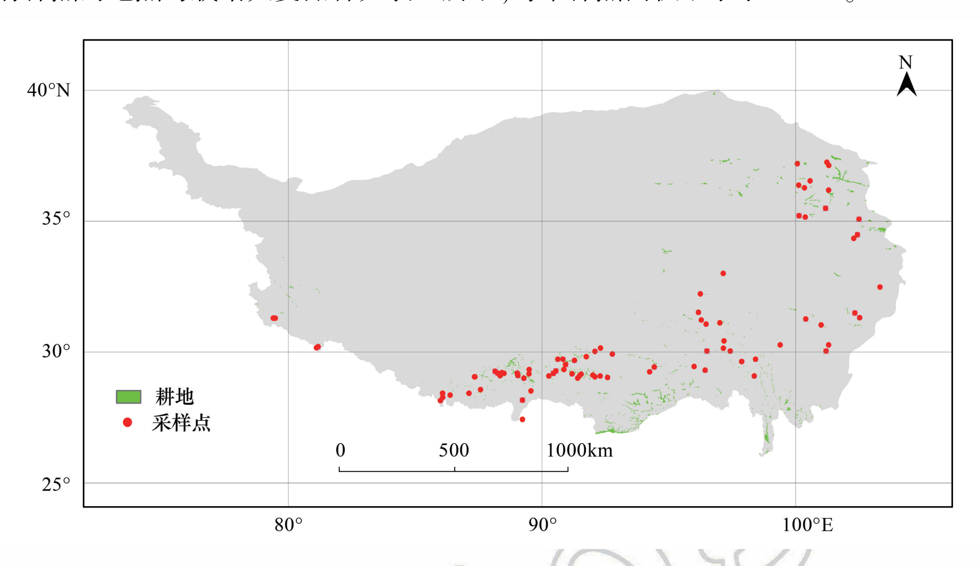


图 1 采样点分布图

Fig.1 The locations of sampling sites

(2)植物样品采集与分析:于 2014 年 7—9 月在各样点栽培大麦成熟期进行采样。采样时,先用 GPS 定位,并在每个样点随机采收栽培大麦种子 2000.0g,共采集 83 个样点的栽培大麦种子。在采样的基础上,于 2015 年 3 月在西藏农牧学院实习农场对所采集的 83 份种质进行大田种植,小区面积 6.0m×4.0m = 24.0m²,随机区组排列,3 次重复,田间管理略高于当地大田水平。在栽培大麦生长期进行物候期调查,收获后及时将采收的栽培大麦籽粒送回实验室风干后,测定栽培大麦的 WTS。

表 1 采样点与品种信息

Table 1 Sampling sites and variety information

样点代号 Site code	采样地点 Sampling site	经度/(°) Longitude	纬度/(°) Latitude	海拔/m Altitude	品种名称 Variety	品种类型 Type of variety
1	西藏波密县松宗镇东亚村	96.00 E	29.44 N	3010.0	波密白青稞	农家品种
2	西藏白朗县巴扎乡堆村	89.05 E	29.10 N	3869.0	喜拉 22 号	推广品种
3	西藏八宿县帮达乡帮达村	97.16 E	30.14 N	4123.0	帮达黑青稞	农家品种
4	西藏八宿县然乌镇然乌村	96.44 E	29.30 N	3925.0	然乌青稞	农家品种
5	四川巴塘县德达乡吉热村	99.40 E	30.27	3661.0	康青 8 号	推广品种
6	西藏日喀则县边雄乡查玛村	89.03 E	29.19 N	3828.0	喜拉 22 号	推广品种
7	西藏八宿县昌木乡巴度村	96.51 E	30.03 N	3379.0	昌木青稞	农家品种
8	西藏昌都县俄洛镇果洛村	97.02 E	31.11 N	3300.0	喜拉 19 号	推广品种
9	甘肃夏河县博拉乡罗吾村	102.45 E	34.48 N	2985.0	博拉青稞	农家品种
10	青海称多县歇武乡知母达村	97.15 E	33.00 N	3574.0	黑青稞	农家品种
11	西藏察雅县吉塘乡达布村	97.18 E	30.42 N	3527.0	察雅紫青稞	农家品种
12	西藏曲水县南木乡南木村	90.93 E	29.52 N	3625.0	南木青稞	农家品种
13	西藏普兰县吉让乡吉让村	81.11 E	30.16 N	3877.0	普兰白青稞	农家品种
14	四川炉霍县泥巴乡朱巴村	100.41 E	31.26 N	3165.0	泥巴青稞	农家品种
15	西藏堆龙德庆县古荣乡中古村	90.83 EE	29.72 N	3765.0	堆龙青稞	农家品种

续表

样点代号 Site code	采样地点 Sampling site	经度/(°) Longitude	纬度/(°) Latitude	海拔/m Altitude	品种名称 Variety	品种类型 Type of variety
16	西藏堆龙德庆县马乡那嘎村	90.63 E	29.72 N	4226.0	楚布蓝青稞	农家品种
17	西藏定日县岗嘎镇岗嘎村	86.38 E	28.35 N	4347.0	岗嘎青稞	农家品种
18	四川道孚县玛子乡居然村	101.01 E	31.03 N	3014.0	康定黑青稞	农家品种
19	西藏定日县协各尔镇朗嘎村	87.12 E	28.42 N	4418.0	藏青 690	推广品种
20	青海大通县宝库乡寺塘村	101.32 E	37.13 N	2957.0	大通黑青稞	农家品种
21	西藏达孜县帮堆乡加古村	91.28 E	29.68 N	3727.0	藏青 2000	推广品种
22	青海刚察县沙柳乡沙柳河村	100.07 E	37.19 N	3295.0	蓝青稞	农家品种
23	青海贵德县嘎绕乡愉胡村	101.31 E	36.18 N	3177.0	嘎绕青稞	农家品种
24	青海贵德县过马营乡角色村	101.19 E	35.49 N	2977.0	北青 8 号	推广品种
25	西藏贡嘎县岗堆镇吉纳村	90.45 E	29.18 N	3586.0	岗堆青稞	农家品种
26	青海共和县江西沟镇大仓村	100.13 E	36.37 N	3223.0	江西沟青稞	农家品种
27	青海海南州倒淌河镇甲乙村	100.36 E	36.27 N	3247.0	北青 7 号	推广品种
28	青海海晏县银滩乡夏三角城村	100.58 E	36.54 N	3029.0	北青 3 号	推广品种
29	甘肃合作市下卡加曼乡拉寨村	102.51 E	35.07 N	2682.0	加曼青稞	农家品种
30	四川松潘县川主寺镇东柏村	103.34 E	32.48 N	3065.0	松潘青稞	农家品种
31	西藏拉孜县柳乡协嘎村	89.29 E	29.00 N	3975.0	拉孜红青稞	农家品种
32	西藏江孜县龙马乡达龙村	89.57 E	28.51 N	4361.0	藏青 25	推广品种
33	西藏加查县安绕镇塘麦村	92.30 E	29.08 N	3335.0	加查蓝青稞	农家品种
34	西藏康马县嘎拉乡琼桂村	89.23 E	28.16 N	4015.0	康马白青稞	农家品种
35	四川理县沙坝乡沙坝村	102.54 E	31.31 N	2419.0	津沟寨青稞	农家品种
36	西藏工布江达县甲兴乡夏马塘村	92.78 E	29.92 N	3888.0	甲兴黑青稞	农家品种
37	西藏浪卡子县白地乡白地村	90.27 E	29.08 N	4457.0	白地早熟青稞	农家品种
38	西藏朗县朗镇堆巴村	92.59 E	29.02 N	3139.0	朗县青稞	农家品种
39	西藏拉孜县查务乡查务村	87.34 E	29.05 N	4117.0	拉孜黑青稞	农家品种
40	西藏林芝县鲁朗镇果洛村	94.43 E	29.42 N	3441.0	果洛	农家品种
41	西藏拉孜县乃日乡贡岗村	87.36 E	29.05 N	4021.0	拉孜黑青稞	农家品种
42	西藏隆子县热荣乡沃唐村	92.31 E	30.15 N	4200.0	隆子黑青稞	农家品种
43	西藏隆子县日当乡玉白村	92.09 E	30.02 N	4073.0	隆子紫青稞	农家品种
44	甘肃碌曲县玛艾乡甲子村	102.30 E	34.34 N	3125.0	玛艾青稞	农家品种
45	四川马尔康县梭磨乡砍竹村	102.35 E	31.49 N	3173.0	康青 3 号	推广品种
46	西藏芒康县如美镇卡均村	98.43 E	29.72 N	3744.0	如美青稞	农家品种
47	西藏米林县卧龙乡麦村	98.38 E	29.08 N	3015.0	卧龙青稞	农家品种
48	西藏米林县米林农场促沙村	94.25 E	29.24 N	2937.0	米林蓝青稞	农家品种
49	青海门源县大滩乡蒂美村	101.24 E	37.25 N	2997.0	蓝青稞	农家品种
50	西藏墨竹工卡县卡巴乡德仲村	91.75 E	29.82 N	3835.0	藏青 85	推广品种
51	西藏乃东县颇章乡雅砻索卡村	91.48 E	29.08 N	3645.0	藏青 320	推广品种
52	西藏聂拉木县门布乡乃多村	86.09 E	28.27 N	4568.0	门布白青稞	农家品种
53	西藏聂拉木县门布乡年多村	86.08 E	28.42 N	4539.0	年多黑青稞	农家品种
54	西藏尼木县卡如乡卡如村	90.87 E	29.33 N	3790.0	尼木紫青稞	农家品种
55	西藏南木林县乃乡迟雄村	89.50 E	29.33 N	3787.0	喜拉 6 号	推广品种
56	西藏聂拉木县聂拉木镇江岗村	86.00 E	28.14 N	4048.0	黑青稞	农家品种
57	青海囊谦县坎达乡卫欧村	96.25 E	32.22 N	3712.0	坎达青稞	农家品种
58	西藏类乌齐县滨达镇滨达村	96.48 E	31.06 N	3743.0	滨达白青稞	农家品种
59	西藏类乌齐县类乌齐镇达古村	96.29 E	31.22 N	3913.0	达古黑青稞	农家品种
60	西藏类乌齐县加桑乡乌热村	96.17 E	31.51 N	3717.0	加桑白青稞	农家品种
61	西藏普兰县多油乡嘎入村	81.17 E	30.20 N	4082.0	普兰紫青稞	农家品种

续表

样点代号 Site code	采样地点 Sampling site	经度/(°) Longitude	纬度/(°) Latitude	海拔/m Altitude	品种名称 Variety	品种类型 Type of variety
62	西藏琼杰县拉玉乡白那村	91.41 E	29.00 N	3810.0	琼杰黑青稞	农家品种
63	西藏曲水县查马拉乡柏林村	90.55 E	29.27 N	3619.0	藏青 3179	推广品种
64	西藏曲松县曲松乡下落村	92.09 E	29.05 N	3680.0	下落青稞	推广品种
65	西藏仁布县仁布乡仁布村	89.49 E	29.16 N	3856.0	仁布白青稞	农家品种
66	西藏日喀则县东嘎乡出贵村	88.42 E	29.21 N	3860.0	东嘎青稞	农家品种
67	西藏日喀则县尼日雄乡崇真村	88.51 E	29.18 N	3838.0	尼日雄黑青稞	推广品种
68	西藏萨迦县扎西岗乡康沙村	87.58 E	28.56 N	4231.0	萨迦黑青稞	推广品种
69	西藏萨迦县茶秀乡住马村	88.35 E	29.09 N	4010.0	桔	农家品种
70	西藏桑日县绒乡多纳村	92.01 E	29.11 N	3608.0	绒乡白青稞	农家品种
71	西藏桑日县绒乡冲达村	91.55 E	29.15 N	3572.0	绒乡青稞	农家品种
72	青海同德县八沟乡卡刚村	100.14 E	35.20 N	2887.0	八沟青稞	农家品种
73	青海同德县马厂乡泉儿湾村	100.39 E	35.15 N	3296.0	北青 1 号	推广品种
74	四川道孚县八美乡卡玛村	101.31 E	30.27 N	3551.0	八美青稞	农家品种
75	西藏谢通门县查布乡查布村	88.15 E	29.26 N	4010.0	查嘎青稞	农家品种
76	西藏谢通门县查布乡美热村	88.25 E	29.19 N	3897.0	果 纳	农家品种
77	四川雅江县八角楼乡维地村	101.21 E	30.03 N	3154.0	红青稞	农家品种
78	西藏札达县托林镇托林村	79.48 E	31.29 N	3700.0	札达白青稞	农家品种
79	西藏札达县曲木底乡机布让村	79.40 E	31.29 N	3670.0	曲木青稞	农家品种
80	西藏左贡县档达乡乌雅村	97.88 E	29.63 N	3824.0	档达黑青稞	农家品种
81	西藏左贡县美玉乡斜库村	97.43 E	30.03 N	3926.0	美玉青稞	农家品种
82	西藏扎囊县扎塘乡羊嘎村	91.19 E	29.16 N	3576.0	扎囊白青稞	农家品种
83	西藏亚东县康布乡康布村	89.23 E	27.42 N	3153.0	康布蓝青稞	农家品种

(3)土壤样品采集与分析:在每个样点进行栽培大麦种子采样的同时,设 5—6 个样方,于每个样方(面积不小于 $20m^2$)中随机采集耕作层(0—30cm)土壤样品 3 份,将其装入土壤布袋,送回实验室风干后,磨细过 1mm 筛,测定土壤全氮、全磷、全钾、速效氮、速效磷、速效钾、pH 值、有机质等理化指标。其中:土壤全氮和速效氮采用半微量凯氏法,土壤全磷和速效磷测定采用钼锑抗比色法,土壤全钾和速效钾测定采用原子吸收分光光度法,土壤有机质采用重铬酸钾氧化—外加热法、土壤 pH 值采用电位法进行测定。

1.3 数据分析与处理

首先,利用同一环境条件下种植后 83 份种质的 WTS 数据分成 5 类(即<40,40—45,45—50,50—60、>60g),利用 ArcGIS 9.3 软件作其空间分布图。其次,基于目前条件下在青藏高原跨越 10 个纬度、26 个经度范围内,安排数十个试验点、数个品种进行统一种植试验的困难性和认为对不同来源地的栽培大麦品种同一环境条件下种植后样本的 WTS 数据进行多重比较,找出生物统计学上千粒重差异不显著的最大样点数,视为这些样点来源的品种间在千粒重上无明显差异。并利用所分析的这些样点所采收来的栽培大麦种子的千粒重与原产地的地理、土壤和气候数据,研究栽培大麦 WTS 与环境因子之间的关系,其方法是可行的,其结果能够反映栽培大麦 WTS 与环境因子之间关系的观点,运用逐步回归分析法建立栽培大麦 WTS 与地理、气候(注:气候资料来源于中国国家气象信息中心)、土壤因子之间的关系方程。在此基础上,采用随机森林回归分析法,综合分析与栽培大麦 WTS 相关性显著的各个环境因子对青藏高原栽培大麦 WTS 影响的重要程度。

2 结果与分析

2.1 青藏高原栽培大麦 WTS 的分布特征

2.1.1 青藏高原栽培大麦 WTS 的水平分布特征

对 83 个不同来源地的栽培大麦品种在同一环境条件下种植后籽粒的 WTS 进行了测定与方差分析。结

果表明,83 个不同来源地的栽培大麦品种 WTS 变幅为 32.2—173.8g,平均值为(46.5928±8.2573)g,变异系数为 17.72%。不同来源地的栽培大麦品种 WTS 存在显著性差异(表 2)。在此基础上,采用 ArcGIS 9.3 软件作其空间分布图(图 2),从图 2 可以看出,栽培大麦 WTS 在青藏高原形成了两个高值区。其中:一个是介于 88.0°—91.5°E、28.0°—30.0°N 之间,以西藏曲水、堆龙德庆、白朗、乃东、日喀则、扎囊、贡嘎、加查、达孜、谢通门、拉孜、定日为中心的青藏高原西南部高值区,这一区域栽培大麦 WTS 平均在(56.1600±8.6587)g 左右;另一个是介于 100.0°—101.5°E、36.5°—37.5°N 之间,以青海海晏、门源、刚察为中心的青藏高原东北部高值区,这一区域栽培大麦 WTS 平均在(54.5000±4.1838)g 左右。同时,从图 2 还可以看出,青藏高原栽培大麦 WTS 的水平分布总体呈现出斑块状交错分布。

表 2　不同来源地栽培大麦品种籽粒千粒重的 *F* 检验

Table 2　*F*-test of WTS of cultivated barley variety form different place

变异来源 Variation	平方和 SS	*df*	均方 MS	*F*	*P*
区组间 Inter-blocks	15.3509	2	7.6755	0.718	0.4892
处理间 Inter-treatments	15358.036	82	187.2931	17.525	0.0069
误差 Error	1752.6957	164	10.6872		
总变异系数 Total CV	17126.082	248			

SS: Sum Squares; DF: Degree of Freedom; MS: Mean Square; CV: Coefficient of Variation

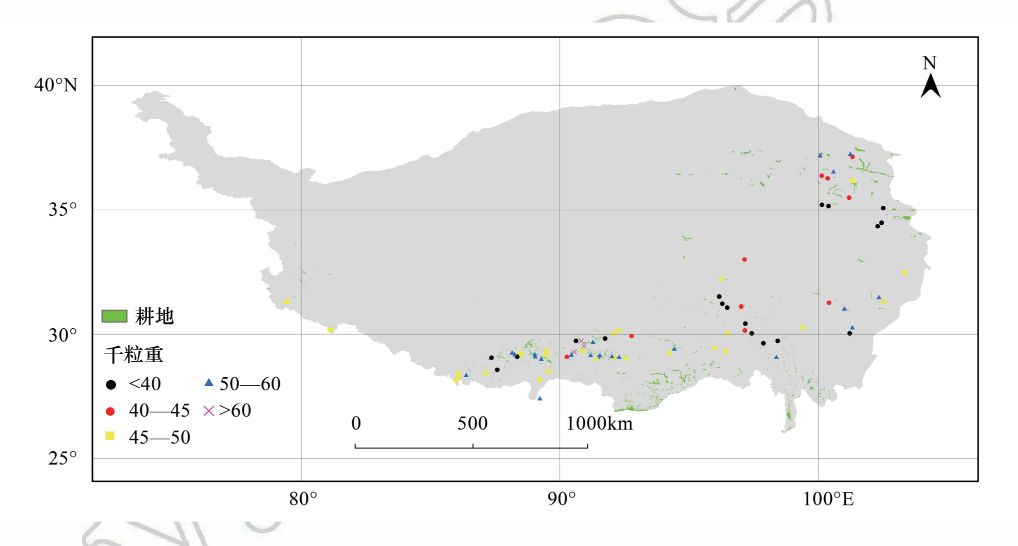


图 2　青藏高原栽培大麦 WTS 水平分布状况/g

Fig.2　WTS distribution conditions of cultivated barley along the horizontal direction in Qinghai-Tibet Plateau

2.1.2　青藏高原栽培大麦 WTS 的垂直分布特征

从表 3 可以看出,随着海拔升高,栽培大麦 WTS 的变化呈现出"N"型分布格局。即自海拔 2700.0m 以下,随着海拔的升高,栽培大麦 WTS 逐渐增加,在海拔 3600.0—3900.0m 之间达到最高值,此海拔区间栽培大麦籽粒淀粉平均含量为(49.6815±10.0764)g,此后随着海拔的升高,栽培大麦 WTS 逐渐有下降,在 4200.0—4500.0m 之间达到谷底,此后随着海拔的升高,栽培大麦 WTS 又逐渐有增多,在 4500.0m 以上达到次高值,此海拔区间栽培大麦 WTS 为(47.9500±0.1732)g。同时,从表 3 还可以看出,栽培大麦 WTS 变异系数随着海拔的升高而呈现"波浪"型分布格局。

2.2　青藏高原栽培大麦 WTS 与生态因子的关系

研究就 2015 年在西藏农牧学院实习农场对 2014 年不同来源地所采集的 83 份栽培大麦种质进行大田种植后的 WTS 数据进行多重比较,发现 83 个样点采收来的栽培大麦种子在同一环境条件下种植后 WTS 数据在生物统计学上差异不显著的最大样点数为 53 个,其栽培大麦 WTS 的变幅在 9.0%—11.0%。为此,利用所

分析的这 53 个样点 2014 年所采收来的栽培大麦种子的千粒重与原产地的地理、土壤和气候数据,建立了栽培大麦 WTS 与环境因子之间的关系方程,现分述如下。

表 3 不同海拔梯度栽培大麦 WTS 的分布状况

Table 3 WTS distribution conditions of cultivated barley along the altitude in Qinghai-Tibet Plateau

海拔高度/m Altitude	样点数 Sampling sites	平均值/% Average	变异系数/% CV
<2700	2	41.9500±8.0252	19.13
2700—3000	6	42.7167±6.9292	16.22
3000—3300	17	45.9588±6.7123	14.61
3300—3600	9	47.5222±6.4337	13.54
3600—3900	27	49.6815±10.0764	20.28
3900—4200	14	44.2500±7.2174	16.31
4200—4500	6	43.5333±8.2836	19.03
>4500	2	47.9500±0.1732	0.36
合计 Total	83	46.5928±8.2573	17.72

2.2.1 栽培大麦 WTS 与地理因子的关系

基于逐步回归分析法,建立栽培大麦 WTS 与地理经度(X_1)、纬度(X_2)、海拔(X_3)等地理因子的关系方程如下:

$$Y=146.7202-0.8292X_1-0.0058X_3 \quad (N=53 \quad R=0.2638 \quad R_1=-0.3332^* \quad R_3=-0.2363) \quad (1)$$

从式(1)可以看出,影响栽培大麦 WTS(Y)的主要地理因子是地理经度(X_1)和海拔(X_3),而地理纬度(X_2)的影响则很小。同时式(1)还可以看出,栽培大麦 WTS 与地理经度(X_1)的偏相关系数达到显著负相关差异水平,但是与海拔的偏相关关系未达到显著性($P<0.05$)差异。根据标准误差检验,该回归方程未通过 ə=0.05 水平的显著性检验。表明,栽培大麦 WTS 随着地理经度的增加而显著增加。造成这一现象的原因可能与不同地理经度下的气候、土壤差异影响栽培大麦 WTS 有关。同时也表明,地理因子对栽培大麦 WTS 的影响未达到显著性水平($P<0.05$)。

2.2.2 栽培大麦 WTS 与气候因子的关系

基于逐步回归分析法,建立栽培大麦 WTS 与出苗—分蘖期日照时数(X_1)、分蘖—拔节期日照时数(X_2)、拔节—抽穗期日照时数(X_3)、抽穗—成熟期日照时数(X_4)、出苗—分蘖期平均气温(X_5)、分蘖—拔节期平均气温(X_6)、拔节—抽穗期平均气温(X_7)、抽穗—成熟期平均气温(X_8)、出苗—分蘖期平均气温日较差(X_9)、分蘖—拔节期平均气温日较差(X_{10})、拔节—抽穗期平均气温日较差(X_{11})、抽穗—成熟期平均气温日较差(X_{12})、出苗—分蘖期平均相对湿度(X_{13})、分蘖—拔节期相对湿度(X_{14})、拔节—抽穗期相对湿度(X_{15})、抽穗—成熟期相对湿度(X_{16})、出苗—分蘖期降水(X_{17})量、分蘖—拔节期降水量(X_{18})、拔节—抽穗期降水量(X_{19})、抽穗—成熟期降水量(X_{20})等气候因子的关系方程如下:

$$Y==23.4949-19.2711\ X_2+19.1457\ X_4-0.7225\ X_5+0.9636\ X_8+0.3108\ X_{11}+0.0852\ X_{15}-0.0448\ X_{19}+0.0519\ X_{20}$$
$$(N=53 \quad R=0.6877^{**} \quad R_2=-0.3877^{**} \quad R_4=0.3879^{**} \quad R_5=-0.2676 \quad R_8=0.2919^* \quad R_{11}=0.3761^* \quad R_{15}=0.2306$$
$$R_{19}=-0.1631 \quad R_{20}=0.30622^*) \quad (2)$$

从式(2)可以看出,影响栽培大麦 WTS(Y)的主要气候因子是分蘖—拔节期日照时数(X_2)、抽穗—成熟期日照时数(X_4)、出苗—分蘖期平均气温(X_5)、抽穗—成熟期平均气温(X_8)、拔节—抽穗期平均气温日较差(X_{11})、拔节—抽穗期相对湿度(X_{15})、拔节—抽穗期降水量(X_{19})、抽穗—成熟期降水量(X_{20}),而出苗—分蘖期日照时数(X_1)、拔节—抽穗期日照时数(X_3)、分蘖—拔节期平均气温(X_6)、拔节—抽穗期平均气温(X_7)、出苗—分蘖期平均气温日较差(X_9)、分蘖—拔节期平均气温日较差(X_{10})、抽穗—成熟期平均气温日较差(X_{12})、出苗—分蘖期平均相对湿度(X_{13})、分蘖—拔节期相对湿度(X_{14})、抽穗—成熟期相对湿度(X_{16})、出苗—分蘖期降水(X_{17})量、分蘖—拔节期降水量(X_{18})的影响则很小。

同时,从式(2)还可以看出,栽培大麦 WTS 与抽穗—成熟期日照时数、抽穗—成熟期平均气温、拔节—抽穗期平均气温日较差、抽穗—成熟期降水量的偏相关系数均达到显著或极显著正相关差异水平,与分蘖—拔节期日照时数的偏相关系数达到极显著负相关差异水平,但是与出苗—分蘖期平均气温、拔节—抽穗期相对湿度、拔节—抽穗期降水量的偏相关关系未达到显著性($P<0.05$)差异。根据标准误差检验,该回归方程通过了$\partial=0.01$ 水平的显著性检验。表明,气候因子对栽培大麦 WTS 具有显著的影响,其中影响最显著的气候因子是抽穗—成熟期降水量、抽穗—成熟平均气温、抽穗—成熟期日照时数、分蘖—拔节期日照时数和拔节—抽穗平均气温日较差。在青藏高原,栽培大麦 WTS 随着抽穗—成熟期日照时数、抽穗—成熟期平均气温、拔节—抽穗期平均气温日较差、抽穗—成熟期降水量的增加和分蘖—拔节期日照时数的减少而显著增加,反映出青藏高原栽培大麦 WTS 与这些气候要素之间具有密切的关系。

2.2.3　栽培大麦 WTS 与土壤因子的关系

基于逐步回归分析法,建立栽培大麦 WTS 与土壤有机质(X_1)、全氮(X_2)、全磷(X_3)、全钾(X_4)、速效氮(X_5)、速效磷(X_6)、速效钾含量(X_7)和土壤 pH 值(X_8)等土壤因子的数学模型:

$$Y=50.1515-0.0013X_5-0.0076X_7 \quad (N=53 \quad R=0.3407^{*} \quad R_5=-0.1043 \quad R_7=-0.2921^{*}) \qquad (3)$$

从式(3)可以看出,影响栽培大麦 WTS(Y)的主要土壤因子是土壤速效氮(X_5)、速效钾含量(X_7),而土壤有机质(X_1)、全氮(X_2)、全磷(X_3)、全钾(X_4)、速效磷(X_6)、和土壤 pH 值(X_8)的影响则很小。同时从式(3)还可以看出,栽培大麦 WTS 与土壤速效钾含量的偏相关系数达到显著负相关差异水平,与土壤速效氮(X_5)的偏相关系数未达到显著性差异水平。根据标准误差检验,该回归方程未通过$\partial=0.05$ 水平的显著性检验。表明,栽培大麦 WTS 随着土壤速效钾含量的减少而显著增加。造成这一现象的原因可能与钾素营养影响栽培大麦 WTS 有关。同时也表明,土壤因子对栽培大麦 WTS 的整体影响未达到显著性水平($P<0.05$)。

2.2.4　栽培大麦 WTS 与综合因子的关系

通过以上分析可以看出,栽培大麦 WTS 与地理经度、抽穗—成熟期日照时数、抽穗—成熟期平均气温、拔节—抽穗期平均气温日较差、抽穗—成熟期降水量、土壤速效钾含量的偏相关系数均达到显著或极显著相关差异水平。但是,这些因子对栽培大麦 WTS 的影响程度如何尚不清楚。为此,我们运用随机森林回归分析法,对栽培大麦 WTS 影响显著的这 7 个变量进行了随机森林回归分析。从表 4 可以看出,这 7 个变量对栽培大麦 WTS 影响从大到小的顺序是抽穗—成熟期降水量>土壤速效钾含量>分蘖—拔节期日照时数>抽穗—成熟平均气温>抽穗—成熟期日照时数>拔节—抽穗平均气温日较差>地理经度。这一研究结果反映出抽穗—成熟期的降水量、平均气温和日照时数以及分蘖—拔节期日照时数、抽穗—成熟期>拔节—抽穗平均气温日较差对栽培大麦 WTS 具有显著的影响。同时,反映出土壤速效钾含量和地理经度对栽培大麦 WTS 也有一定的影响。

表 4　不同因子对栽培大麦 WTS 影响的重要程度

Table 4　Importance value of different influencing factors on WTS of cultivated barley

因子 Factor	重要值 Importance value	因子 Factor	重要值 Importance value
抽穗—成熟期降水量 Precipitation during the growth period from heading to maturation	1.2574	分蘖—拔节期日照时数 Sunshine hours during the growth period from tillering to elongation	1.0778
抽穗—成熟期日照时数 Sunshine hours during the growth period from heading to maturation	0.9535	抽穗—成熟期平均气温 Average temperature during the growth period from heading to maturation	1.0005
地理经度 Longitude	0.8579	拔节—抽穗期平均气温日较差 Average diurnal temperature range during the growth period from elongation to heading	0.9474
土壤速效氮含量 Soil available N content	1.0894		

3 结论与讨论

本文研究结果表明,影响青藏高原栽培大麦 WTS 的环境因子是主要气候因素,其次是土壤因素和地理因素。其中,影响青藏高原栽培大麦 WTS 的气候因子主要是抽穗—成熟期日照时数、出苗—分蘖期平均气温日较差、分蘖—拔节期平均气温日较差和拔节—抽穗期相对湿度,土壤因子主要是土壤速效钾含量,地理因素主要是地理经度。受这些环境因素的影响,青藏高原栽培大麦 WTS 在地理水平方向上,总体呈现出斑块状交错分布的格局,并形成了以西藏曲水、堆龙德庆、白朗、乃东、日喀则、扎囊、贡嘎、加查、达孜、谢通门、拉孜、定日为中心的青藏高原西南部和青海海晏、门源、刚察为中心的青藏高原东北部等 2 个栽培大麦 WTS 高值区;在地理垂直方向上,呈现出"N"型分布格局,在海拔 3600.0—3900.0m 和 4500.0m 以上形成 2 个 WTS 高值区。造成这一现象的原因可能与不同的地理范围内的气候与土壤差异影响青藏高原栽培大麦 WTS 有关。这与许多学者认为大麦 WTS 虽然主要受品种特性,即遗传因素的控制,但环境因素对它也有明显影响的研究结果[19-21]一致,但与 Bertholdsson 认为瑞典和丹麦在不同年份间大麦 WTS 没有明显的变化[13];Mariano 认为在地中海高温和缺水环境下,大麦 WTS 的变化不明显[14]的研究结果相反。

本文研究还表明,青藏高原栽培大麦 WTS 与抽穗—成熟期日照时数、抽穗—成熟期平均气温、拔节—抽穗期平均气温日较差、抽穗—成熟期降水量的呈显著正相关关系,这一研究结果与 Ulla 对英国二棱大麦(Hordeum vulgare)春型品种巴克随着日照时间的缩短,大麦 WTS 逐渐减小[22];Novo 认为灌浆期较高的温度,有利于欧洲潘诺尼亚区大麦 WTS 的增加[2]的研究结果一致;但是与 Novo 认为灌浆期较高的较少的降水,有利于欧洲潘诺尼亚区大麦 WTS 的增加[2];Guillermoa 对克罗地亚大麦的研究结果表明,随着生育期间温度的升高,WTS 逐渐下降[23-24];Petra 对德国斯图加特大麦的研究结果表明,当在 4 厘米深度的土壤温度比正常条件下增加 2.5°C,WTS 减少 4.0%[25];Wei 对中国大麦的研究表明,随着温度的升高,WTS 逐渐下降[26]的研究结果相反,其原因尚不清楚。

参考文献(References):

[1] Savin R, Molina-Cano J L. Changes in malting quality and its determinants in response to abiotic stresses // Slafer G A, Molina-Cano J L, Savin R, Araus J L, Romagosa I, eds. Barley Science: Recent Advances from Molecular Biology to Agronomy of Yield and Quality. New York: Food Products Press, 2002: 523-550.

[2] Pržulj N, Momčilović V, Simić J, Mirosavljević M. Effect of growing season and variety on quality of spring two-rowed barley. Genetika, 2014, 46(1): 59-73.

[3] Passarella V S, Savin R, Abelledo L G, Slafer G A. Malting quality as affected by barley breeding (1944-1998) in Argentina. Euphytica, 2013, 134(2): 161-167.

[4] Griffey C, Brooks W, Kurantz M, Thomason W, Taylor F, Obert D, Moreau R, Flores R, Sohn M, Hicks K. Grain composition of Virginia winter barley and implications for use in feed, food, and biofuels production. Journal of Cereal Science, 2010, 51(1): 41-49.

[5] Qi J C, Zhang G P, Zhou M X. Protein and hordein content in barley seeds as affected by nitrogen level and their relationship to *beta*-amylase activity. Journal of Cereal Science, 2006, 43(1): 102-107.

[6] 王建林, 栾运芳, 大次卓嘎, 胡单. 西藏栽培大麦变种组成和分布规律研究. 中国农业科学, 2006, 39(11): 2163-2169.

[7] Pettersson C G, Eckersten H. Prediction of grain protein in spring malting barley grown in northern Europe. European Journal of Agronomy, 2007, 27(2/4): 205-214.

[8] Prado S A, Gallardo J M. Serrago R A, Kruk B C, Miralles D J. Comparative behavior of wheat and barley associated with field release and grain weight determination. Field Crops Research, 2013, 144: 28-33.

[9] Zhang G P, Chen J X, Dai F, Wang J M, Wu F B. The effect of cultivar and environment on β-amylase activity is associated with the change of protein content in barley grains. Journal of Agronomy and Crop Science, 2006, 192(1): 43-49.

[10] Hall A J, Richards R A. Prognosis for genetic improvement of yield potential and water-limited yield of major grain crops. Field Crops Research, 2013, 143: 18-33.

[11] Lizana X C, Calderini D F. Yield and grain quality of wheat in response to increased temperatures at key periods for grain number and grain weight determination: considerations for the climatic change scenarios of Chile. The Journal of Agricultural Science, 2013, 151(2): 209-221.

[12] Bingham I J, Blake J, Foulkes M J, Spink J. Is barley yield in the UK sink limited? II. Factors affecting potential grain size. Field Crops Research, 2007, 101(2): 212-220.

[13] Bertholdsson N O, Brantestam A K. A century of nordic barley breeding-effects on early vigour root and shoot growth, straw length, harvest index and grain weight. European Journal of Agronomy, 2009, 30(4): 266-274.

[14] Cossani C M, Slafer G A, Savin R. Do barley and wheat (bread and durum) differ in grain weight stability through seasons and water-nitrogen treatments in a mediterranean location? Field Crops Research, 2011, 121(2): 240-247.

[15] 马得泉. 中国西藏大麦遗传资源. 北京: 中国农业出版社, 2000: 123-215.

[16] 强小林, 迟德钊, 冯继林. 青藏高原区域青稞生产与发展现状. 西藏科技, 2008(3): 11-17.

[17] 王建林. 西藏高原作物栽培学. 北京: 中国农业出版社, 2012: 156-218.

[18] 强小林, 顿珠次仁, 次珍, 魏新虹, 张玉红. 西藏青稞产业发展现状分析. 西藏农业科技, 2011, 33(1): 1-3.

[19] Agegnehu G, Nelson P N, Bird M I. The effects of biochar, compost and their mixture and nitrogen fertilizer on yield and nitrogen use efficiency of barley grown on a Nitisol in the highlands of Ethiopia. Science of the Total Environment, 2016, 569-570: 869-879.

[20] Abou-Elwafa S F. Association mapping for yield and yield-contributing traits in barley under drought conditions with genome-based SSR markers. Comptes Rendus Biologies, 2016, 339(5/6): 153-162.

[21] Marley C L, Fychan R, Theobald V J, Cuttle S P, Sanderson R. Effects of a winter or spring sowing date on soil nitrogen utilisation and yield of barley following a forage crop of red clover, lucerne or hybrid ryegrass. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2013, 181: 213-222.

[22] Holopainen U R M, Wilhelmson A, Home S, Poutanen K, Shewry P R. Day-length effects on protein localisation affect water absorption in barley (*Hordeum vulgare*) grains. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2012, 92(15): 2944-2951.

[23] García G A, Serrago R A, Dreccer M F, Miralles D J. Post-anthesis warm nights reduce grain weight in field-grown wheat and barley. Field Crops Research, 2016, 195: 50-59.

[24] García G, Dreccer M F, Miralles D J, Serrago R A. High night temperatures during grain number determination reduce wheat and barley grain yield: a field study. Global Change Biology, 2015, 21(11): 4153-4164.

[25] Högy P, Poll C, Marhan S, Kandeler E, Fangmeier A. Impacts of temperature increase and change in precipitation pattern on crop yield and yield quality of barley. Food Chemistry, 2013, 136(3/4): 1470-1477.

[26] Wei K, Dai F, Wu F B, Zhang G P. The Variation of β-amylase activity and protein fractions in barley grains as affected by genotypes and post-anthesis temperatures. Journal of the Institute of Brewing, 2009, 115(3): 208-213.